DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230911.001

基于兴隆观测基地80厘米望远镜的CSST无缝光谱地面测试

邱晓晴[1,2]，范 舟[2*]，宋轶晗[2]，顾弘睿[2,3]，姜海娇[4]，李 静[1]

（1. 西华师范大学，四川 南充 637000；2. 中国科学院国家天文台，北京 100101；
3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 清华大学，北京 100084）

摘要：我国预计2025年发射的巡天空间望远镜（Chinese Space Station Telescope，CSST），主要用于开展大规模的多色成像与无缝光谱巡天工作。发射前需要利用地基望远镜对空间望远镜的光学成像系统、探测器，以及设备长时间运行稳定性进行地面测试。设计了兴隆观测基地80 cm望远镜的无缝光谱地面测试，利用A型恒星、B型恒星和沃尔夫拉叶星HD4004的强吸收和发射线特征，拟合色散方程，并发现色散方程具有空间分布特征。对HR3173的53条数据的零级谱位置信息及色散方程系数进行了二次曲面拟合，并利用该曲面对HR3173零级像位置范围内的HR718数据进行了波长定标，得到的CCD上8×13 pixels范围内的平均视向速度精度为51 km/s。

关键词：无缝光谱；巡天空间望远镜；波长定标
中图分类号：P111.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2023)06-0564-12

传统的长缝光谱是将单个目标源对准一个狭缝，目标源的光通过这个狭缝，并沿着垂直于狭缝的方向色散，得到该目标源的光谱。无缝光谱相较于传统的长缝光谱没有狭缝，光直接通过棱镜（prism）或棱栅（grism）得到包含给定区域内所有天体的光谱色散图[1]。由于无缝光谱拍摄一次就能得到整个视场内所有天体的光谱信息，因此有着极高的光谱获取效率，适用于大面积巡天观测。但由于在无缝光谱学中，每个像素可以接收任意波长的辐射，所以无缝光谱容易受杂散光的影响，导致定标困难。

无缝光谱最开始主要用于地基观测，20世纪70年代，M. G. Smith等在智利泛美天文台（Cerro Tololo）的一架口径为60 cm的施密特望远镜前加上了一块薄物端棱镜，用于发现类星体，使用这种方法发现的类星体的数目成倍增长[2]。

无缝光谱虽然在地基观测中具有一定的价值，但在天基观测中效率更高，这是因为天基观测时的天光背景比地基观测时低许多量级，并且没有明亮且多变的大气吸收和发射成分[1]。

20世纪90年代，哈勃太空望远镜（Hubble Space Telescope，HST）成功发射，其搭载的广角行星相机（the Wide Field Planetary Camera 1，WFPC1）、高级巡天相机（the Advanced Camera for Surveys，ACS）、宽视场相机（Wide Field Camera 3，WFC3）装备有棱栅或棱镜元件，可进行无缝光谱观测，其覆盖的波长范围从紫外到近红外，主要用于研究类星体、超新星等[3-5]。近红外线照相机和多目标光谱仪（Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer，NICMOS）配备了三个棱栅（G096，G141和G206），光谱覆盖的波长范围在0.8~2.5 μm之间，主要用于研究星系的演化[5]。詹姆斯韦布空间望远镜（James Webb Space Telescope，JWST）近红外成像仪和无缝光谱仪（Near Infrared Imager and Slitless

基金项目：国家自然科学基金（12273027，11873013）；四川省青年科技创新研究团队项目（21CXTD0038）和西华师范大学创新团队基金项目（KCXTD2022-6）资助.
收稿日期：2023-04-18；修订日期：2023-05-28
作者简介：邱晓晴，女，硕士研究生，主要研究无缝光谱的地面测试. Email：xqqiu@bao.ac.cn.
* 通信作者：范 舟，男，研究员，主要研究本星系群的多色测光及无缝光谱. Email：zfan@bao.ac.cn.

Spectrograph，NIRISS）的宽场无缝光谱（The Wide Field Slitless Spectroscopy，WFSS）模式能够在 2. 2′ × 2. 2′视场范围内实现 0. 8 ~ 2. 2 μm 之间的低分辨率（$R \approx 150$）无缝光谱，主要研究星系的形成与演化[6]。

以低天光背景和高空间分辨率为特征的无缝光谱学已成为从太空研究星系演化的首选工具，预计它将在未来的任务中（如 CSST，Euclid 和 WFIRST 等）大显身手[7]。

中国巡天空间望远镜预计 2025 年发射，主要用于开展大规模多色测光与无缝光谱巡天工作[8-9]，其科学目标之一是探索星系的起源与演化。在本项工作中，由于巡天空间望远镜无法通过切换直接成像的方法对无缝光谱进行定标，为解决巡天空间望远镜无缝光谱在轨定标困难的问题，本文利用兴隆观测基地的 80 cm 望远镜，在地面进行无缝光谱观测，并建立定标模型，为在轨定标系统提供参考。在测试中，我们利用一维光谱中强吸收线和发射线特征，用多项式方程拟合色散方程，并分析了方程系数在探测器不同位置上的分布特征，同时利用拟合残差计算视向速度的拟合精度。根据已知零级谱数据的位置信息和色散方程系数，进行曲面拟合，建立定标模型，利用此方法得到 CCD 上小范围色散方程的定标精度。我们的工作将为巡天空间望远镜无缝光谱未来的数据处理过程及预期定标精度等提供重要参考。

1　80 cm 望远镜无缝光谱仪器简介

清华-国家天文台望远镜（The Tsinghua-National Astronomical Observatories of China Telescope，TNT）是德国 APM 公司制造的 80 cm 卡塞格林望远镜，由清华大学与中国科学院共同建设，放置在位于河北省兴隆县境内燕山主峰南麓（地理坐标为东经 117°34′38″，北纬 40°23′45″，海拔约 830 m）的兴隆观测站[10]。

TNT 是系统焦比为 $f/10$ 的赤道式卡塞格林反射镜，它由一个有效直径为 0. 80 m 的抛物面主镜和一个有效直径为 0. 26 m 的双曲面副镜组成，主镜焦比为 $f/3$，主焦点改正后焦比为 $f/10$。TNT 的指向系统速度较快且准确，最大回转速度高达每秒 4°，在赤纬大于 25°时，指向精度优于 30″，没有导星跟踪时在 15 min 内的指向漂移小于 1″[11]。安装在 TNT 上的光学探测器是由普林斯顿仪器公司 VersArray 制造的一个高性能的全画幅数码相机系统，它使用背照式科学级 CCD，成像阵列尺寸为 1 340 × 1 300 像素（20 × 20 μm pixel^{-1}），该系统提供的视场为 11. 5′ × 11. 2′，空间分辨率约为 0. 52″ pixel^{-1}[11]。TNT 使用型号为 Andor-DZ936-BEX2-DD 的 CCD，成像阵列尺寸为 2 048 × 2 048 像素（13.5 × 13. 5 μm pixel^{-1}）。TNT 进行的科学项目是超新星的多色光度研究、活动星系核、伽马射线暴等[11]。

为了测试无缝光谱系统，考虑到成像质量以及波长覆盖范围，我们使用兴隆观测基地 80 cm 望远镜进行无缝光谱地面测试。巡天空间望远镜的 GV 波段与 TNT 无缝光谱的零级像以及光谱像的 80% 能量集中度半径平均在 4 pixels 以内；巡天空间望远镜的 GV 波段波长覆盖范围在 400 ~ 600 nm，而 TNT 的无缝光谱测试波长覆盖范围在 400 ~ 700 nm，波长覆盖范围一致。

基于兴隆 TNT 的无缝光谱观测方案见图 1，试验装置由带通滤光片、平面闪耀光栅和 CCD 相机 3 部分组成。滤光片和光栅安装于望远镜焦面前，实现无缝光谱观测。带通滤光片用于抑制带外光谱，避免二级光谱重叠。探测器焦面的无缝光谱图像如图 2，零级像与光谱蓝端之间的光谱间隔为 16. 306 mm，400 ~ 700 nm 光谱长度 9. 166 mm。设备的实物照片见图 3。

2　选源和观测

由于巡天空间望远镜上不会搭载特定的波长定标灯，而是利用合适的标准星来定标，因此 TNT 无缝光谱的地面测试也遵循该策略。棱栅的分辨率极大地限制合适的标准星的选择。标准星应满足以下条件：亮度合适，所需的曝光时间短；光谱包含较多易分辨的发射线或吸收线；不能选择位于密集星场的星，这是为了防止邻近天体的光谱污染，避免在定标数据处理时引入额外误差[4]。

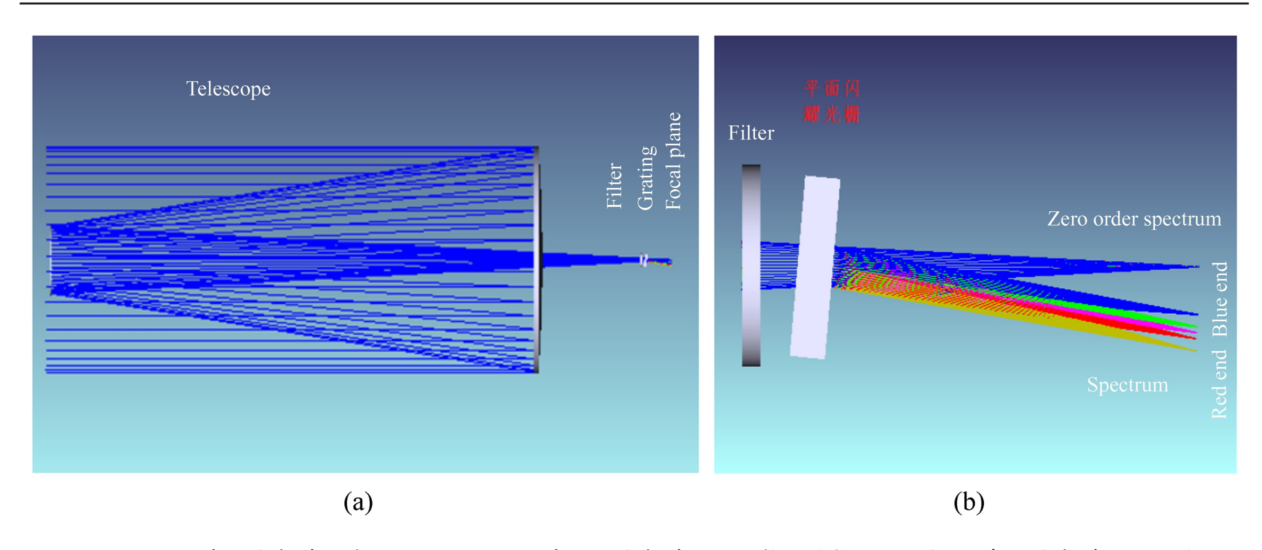


图 1 80 cm 望远镜无缝光谱设计。(a)80 cm 望远镜上无缝光谱仪器的整体结构；(b)是(a)中无缝光谱仪器的放大图

Fig. 1 Design of slitless spectral instrument for 80 cm telescope. The left image shows the overall structure of the slitless spectral instrument on the 80 cm telescope, and the right image shows an enlarged view of the slitless spectral instrument in the left image

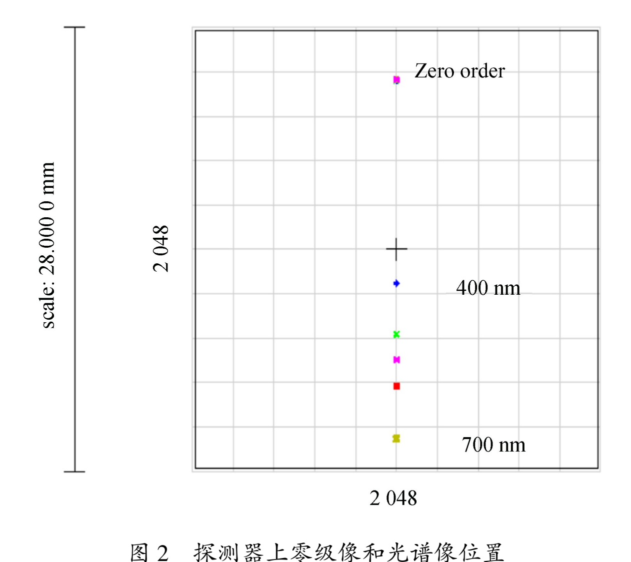


图 2 探测器上零级像和光谱像位置

Fig. 2 Position of zero-order image and spectral image on the detector



图 3 无缝光谱系统与 CCD 相机的实物照片

Fig. 3 Photos of slitless spectrum system and CCD camera

选择不同的定标源，获取的特征谱线也不完全一样。传统的定标源是行星状星云(Planetary Nebulae，PNe)，在光学波段下，其光谱主要是由窄而强的发射线主导，例如 H，He I，[O II]，[N II]，[O III]，[S III]，[N II]，行星状星云可以等同于地面的弧光定标灯[4]。类星体(Quasar Stellar Objects，QSOs)也是定标标准星的一种选择，因为它基本上在任何所需波长范围内具有发射特征(如 Lyα，C IV 等)[12-13]。沃尔夫拉叶星(Wolf-Rayet stars，WR 星)存在一系列的 He 发射线，可以满足定标要求。除此之外，B 型恒星因为存在较强的氢巴尔末线系，也可以作为定标标准星。

我们选择沃尔夫拉叶星 HD4004 以及欧洲南方天文台标准星表中的部分星作为波长定标的标准星，即观测目标源。这些源的基本信息见表 1，表 1 列出了目标源的赤经 *RA*、赤纬 *Dec*、光谱型 SpT、V 波段星等、视向速度 V_R、红移 z、数据数量及定标时用到的谱线。例如 HD4004 的光谱型是 WN4，V 波段星等为 10.138，标准星 BS2845 的光谱型为 B8Ve，有较明显的氢巴尔末吸收线，便于拟合色散方程。

表 1　观测目标源的信息

Table 1　Information on observation target

Target	RA (J2000)	Dec (J2000)	SpT	V /mag	V_R/ (km · s^{-1})	z (10^{-5})	Number	Spectral lines
BS2845	07 27 09.0	+08 17 21	B8Ve	2.90	22.0	7.3	10	Hη, Hζ, Hε, Hδ, Hγ, Hβ, Hα
HD4004	00 43 28.4	00 43 28.4	WN4-s C	10.14	\	\	6	He II 4-3, Hβ (He II 8-4), He II 7-4, CIV, Hα, He II 13-5, He II 12-5, NIV
BS2220	06 14 50.8	+19 09 23	F6V	5.20	34.4	11.5	32	Hε, Hδ, Hγ, Hβ, Hα
BS4039	10 17 14.5	+23 06 22	F8V	5.82	37.2	12.4	27	Hγ, Hβ, Mg, Fe, Hα
BS544	01 53 04.8	+29 34 44	F6IV	3.41	−12.6	−4.2	13	Hγ, Hβ, Mg, Fe, Hα
HR718	02 28 09.5	+08 27 36	B9III	4.28	11.9	4	281	Hζ, Hε, Hδ, Hγ, Hβ
HR3173	08 08 27.0	+51 30 24	A2V C	4.80	11.0	3.7	53	Hε, Hδ, Hγ, Hβ
BS6117	16 25 24.9	+14 02 00	B9p	4.57	−5.9	−2.0	141	Hζ, Hε, Hδ, Hγ, Hβ

我们采取的观测策略是至少在 CCD 的 5 个不同位置对每个目标源进行分光观测，以得到色散方程在 CCD 上随空间的变化[13]。在实际观测过程中，可以通过目标在 CCD 上左右或者上下移动，得到一系列带有无缝光谱一级谱信息的色散图像。

基于 TNT 进行的 3 次无缝光谱地面测试分别是 2021 年 3 月 20 日、2022 年 1 月 18 日到 20 日和 2022 年 11 月 8 日，测试的情况见表 2，第 1 次和第 3 次测试均使用 PI VersArray 1300B LN 背照式科学级 CCD 相机，及美国 ACE 公司生产的高精度双层滤光片转轮系统。第 2 次测试使用的 CCD 型号是 Andor-DZ936-BEX2-DD，使用 2 048 × 2 048 成像阵列(13.5 × 13.5 μm $pixel^{-1}$)。在 TNT 上测试前需先取掉滤光片，再安装无缝光谱系统。兴隆基地的大气和圆顶视宁度约为 2″，观测的源多为较亮的标准星，每颗标准星的曝光时间为 5 s 和 10 s，而沃尔夫拉叶星 HD4004 的曝光时间为 150 s，180 s，210 s，240 s，270 s 及 300 s。图 4 是观测得到的原始数据，(a)是标准星 BS2845 的色散图，(b)是沃尔夫拉叶星 HD4004 的色散图。

表 2　观测概况

Table 2　Overview of observations

Observed time	CCD detector	Pixel number	Pixel size/$μm^2$
2021-03-20	PI VersArray 1300B LN	1 340 × 1 300	20 × 20
2022-01-18-2022-01-20	Andor-DZ936-BEX2-DD	2 048 × 2 048	13.5 × 13.5
2022-11-08	PI VersArray 1300B LN	1 340 × 1 300	20 × 20

3　原始数据处理和光谱提取

无缝光谱的前期观测等工作相对简单，但后期的数据处理是我们面临的主要挑战。目前比较流行的光谱数据处理软件(如 IRAF 等)尚不能满足无缝光谱数据处理的所有需求[1]。aXe 是无缝光谱数据处理比较成熟的软件，但需要较为全面的仪器定标参数。这些参数在测试阶段还没有确定，所以无法用 aXe 处理我们测试得到的无缝光谱数据。

原始数据处理主要使用巡天空间望远镜无缝光谱团队自主研发的管线(pipeline)完成，该管线主要使用 SExtractor(Source-Extractor)从无缝图像中提取单个目标的光谱[14]。最终得到数据包含目标源

光谱在 CCD 上的位置坐标以及谱线值。基本步骤如下：(1)去背景；(2)检测源；(3)对目标源进行定位；(4)抽取目标源谱线，最后存储结果。我们首先使用 SExtractor 提取色散图像的背景，将原始图像减去背景后可以得到一个除掉背景的色散图像。接下来我们使用包含质心坐标，椭圆的半长轴、半短轴和方位角等参数的椭圆模型来检测色散图像中的候选目标源，利用椭圆模型的参数从检测到的一系列源中找出目标源的色散图像。目标源的色散图像轨迹可以使用多项式方程拟合得到，描述轨迹的多项式为[1]

$$y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots , \tag{1}$$

其中，(x, y)是图像坐标；a_0，a_1 和 a_2 依次是常数项、一次项和二次项。

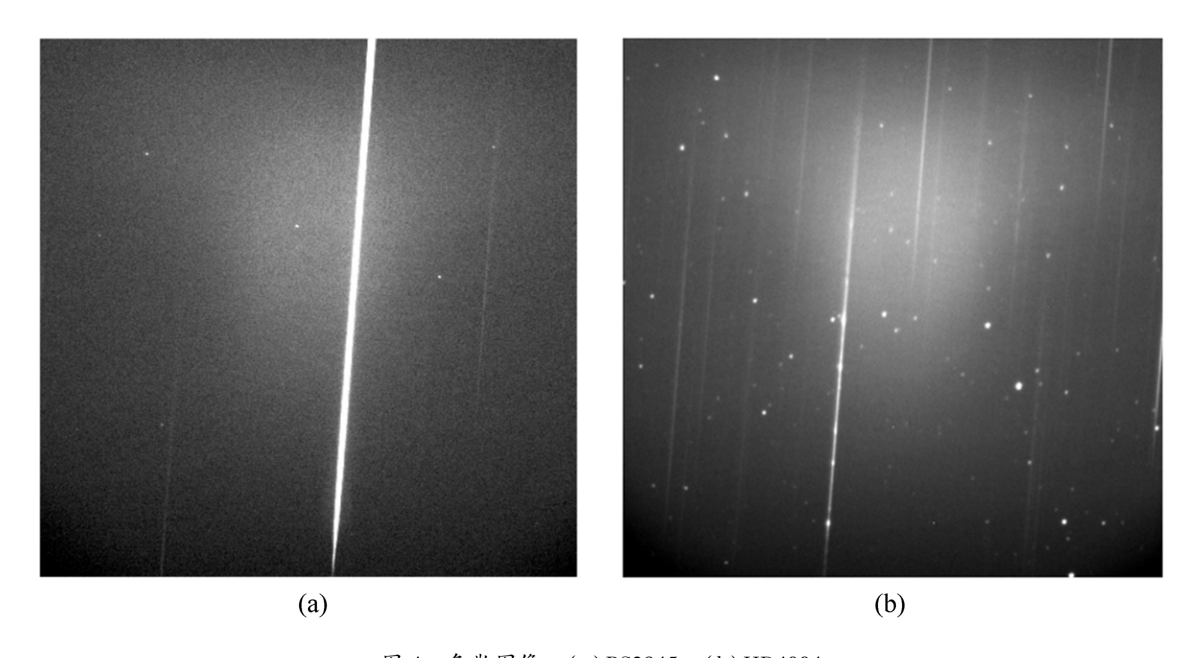


图 4 色散图像。(a)BS2845；(b)HD4004

Fig. 4 Dispersion images. (a) BS2845; (b) HD4004

确定目标谱线在色散图像上的位置后，寻找属于抽谱范围的光谱，把椭圆模型内的 5 个像素累加，最后抽取目标源谱线。图 5 是处理得到的部分源的一维光谱，图 5(a)是标准星 BS2845 的一维光谱，图 5(b)是沃尔夫拉叶星 HD4004 的一维光谱，其中横坐标是 pixel，纵坐标是 counts。

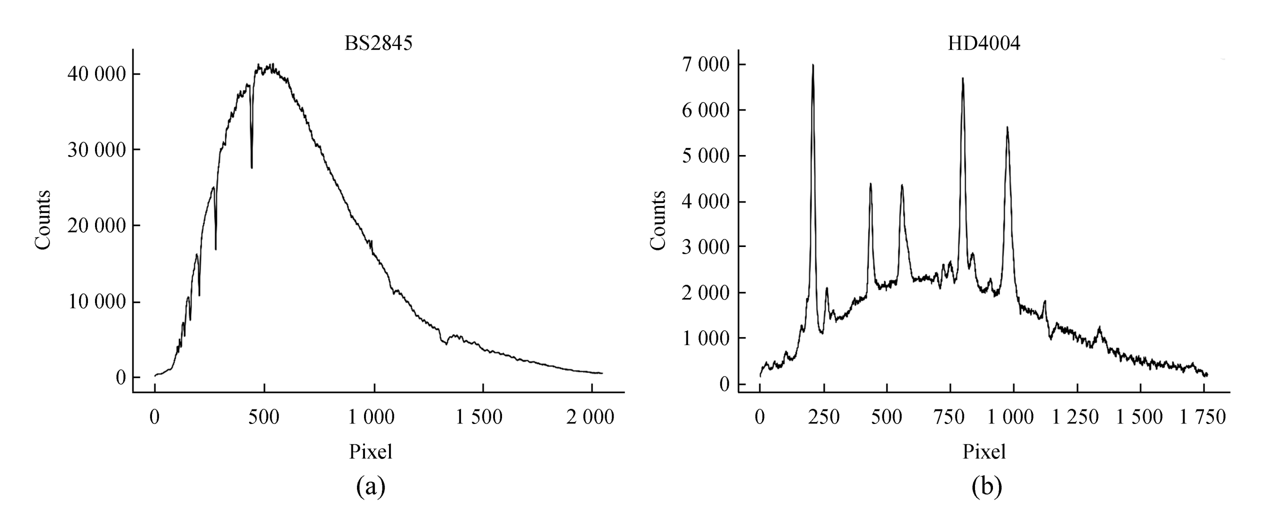


图 5 (a)标准星 BS2845 的一维光谱；(b)沃尔夫拉叶星 HD4004 的一维光谱

Fig. 5 (a) The one-dimension spectrum of BS2845; (b) the one-dimension spectrum of HD4004

4 波长定标

为了将一维光谱从像素空间转换到波长空间，我们对谱线进行了波长定标。由于光栅的色散特性，光谱在 CCD 的成像不是严格线性的，我们可以使用多项式拟合来获取像素与其对应波长的关系[1]，即色散方程。色散关系的多项式为

$$\lambda(l) = l_0 + l_1 \times l + l_2 \times l^2 + \cdots , \quad (2)$$

其中，l 为沿着轨迹的像素距离；l_0，l_1 和 l_2 依次是常数项、一次项和二次项。

为了获得色散方程，我们需要寻找已知谱线信息的光谱作为定标源，最常用的定标源是光谱定标灯。由于无缝光谱仪没有定标灯，所以定标使用已知谱线信息的天体。本文数据中的目标源主要为欧洲南方天文台官网的标准恒星，观测目标源的基本信息见表 1，表 1 还列出了观测目标源的可用数据条数，例如第 1 次测试使用了 BS6117，可用数据为 141 条。第 2 次测试的标准星有 BS2845，BS2220，BS544 和 BS4039，其中 BS2845 有 10 条可用数据，BS2220 有 32 条，BS544 有 13 条，BS4039 有 27 条，HD4004 有 6 条。第 3 次测试的数据为 HR718 以及 HR3173，HR718 有 281 条可用数据，HR3173 有 53 条。

标准星因为存在较强的氢巴尔末线系，所以可以用于谱线定标。表 1 还列出了观测目标源可用的定标谱线，BS6117 可用的定标谱线是 Hζ ，Hε，Hδ，Hγ 和 Hβ；HR718 可用的谱线是 Hζ，Hε，Hδ，Hγ 和 Hβ；HR3173 可用的定标谱线是 Hε，Hδ，Hγ 和 Hβ；BS2845 可用的定标谱线是 Hη，Hζ，Hε，Hδ，Hγ，Hβ 和 Hα；BS2220 可用的定标谱线是 Hε，Hδ，Hγ，Hβ 和 Hα；BS544 和 BS4039 可用的定标谱线 Hγ，Hβ，Mg，Fe 和 Hα；HD4004 选择了 He II 4-3，Hβ(He II 8-4)，He II 7-4，CIV，Hα，He II 13-5，He II 12-5 和 NIV 这几条明显的发射线[15-17]。我们对得到的一维光谱数据进行处理，由于定标源的标准光谱已知，因此可以得到对应的目标源每条谱线在 CCD 上的大致位置。在得到定标目标源谱线的大致线心位置后，利用高斯拟合即可得到该谱线的精确线心位置。图 6 展示了 BS2845 和 HD4004 定标谱线的拟合结果。

在进行无缝光谱地面测试时，由于无法拍摄目标源的直接图像，且绝大多数数据没有 0 级谱，因此，我们选择比较稳定的 Hβ 线心作为参考点(坐标原点)。已知某条经过认证的吸收线(或发射线)在 CCD 上的位置，则可以计算该谱线与参考点的距离 l，用一系列 l 值与对应的吸收线(或发射线)的理论波长做多项式拟合即可获取光谱的色散方程。在拟合前，还需考虑目标源的红移值，包括校正地球自转及公转带来的红移改变，这里用的理论波长是考虑红移后的波长。由于数据中认证的吸收线(或发射线)数量少，色散方程只做到二次多项式拟合，多项式拟合后得到的色散方程见图 7，图 7 展示了 HR718 的 281 条色散方程，横坐标是谱线与参考点的距离，单位是 pixel，纵坐标是谱线对应的波长，单位是 nm。将吸收线(或发射线)与参考点的距离 l 代入色散方程，得到一系列波长值，该值与理论波长的差值即为拟合残差，色散方程的拟合残差见图 8。图 8 是与图 7 对应的 HR718 的残差，横坐标为残差，单位是 nm，纵坐标是残差取值的对应频数，直方图上的虚线是中值线，中值为 2.8×10^{-2}nm。图 9 是标准星 BS2845 经过波长定标后的一维光谱，图上各种颜色的虚线是 Hη，Hζ，Hε，Hδ，Hγ，Hβ，Hα 几条氢巴尔末线，横坐标是波长，单位 nm，纵坐标是 counts。

5 讨 论

第 1 次测试得到标准星 BS6117 的 141 条色散方程，分布在 CCD 上大致 8 个位置；第 2 次测试共得到 89 条色散方程，在 CCD 上呈线状分布；第 3 次测试得到 HR718 和 HR3173 共 334 条色散方程，数据覆盖了 CCD 的大部分区域。我们对得到的色散方程进行两方面的讨论：(1)分析色散方程系数在 CCD 不同位置的分布；(2)CCD 不同位置的视向速度精度。

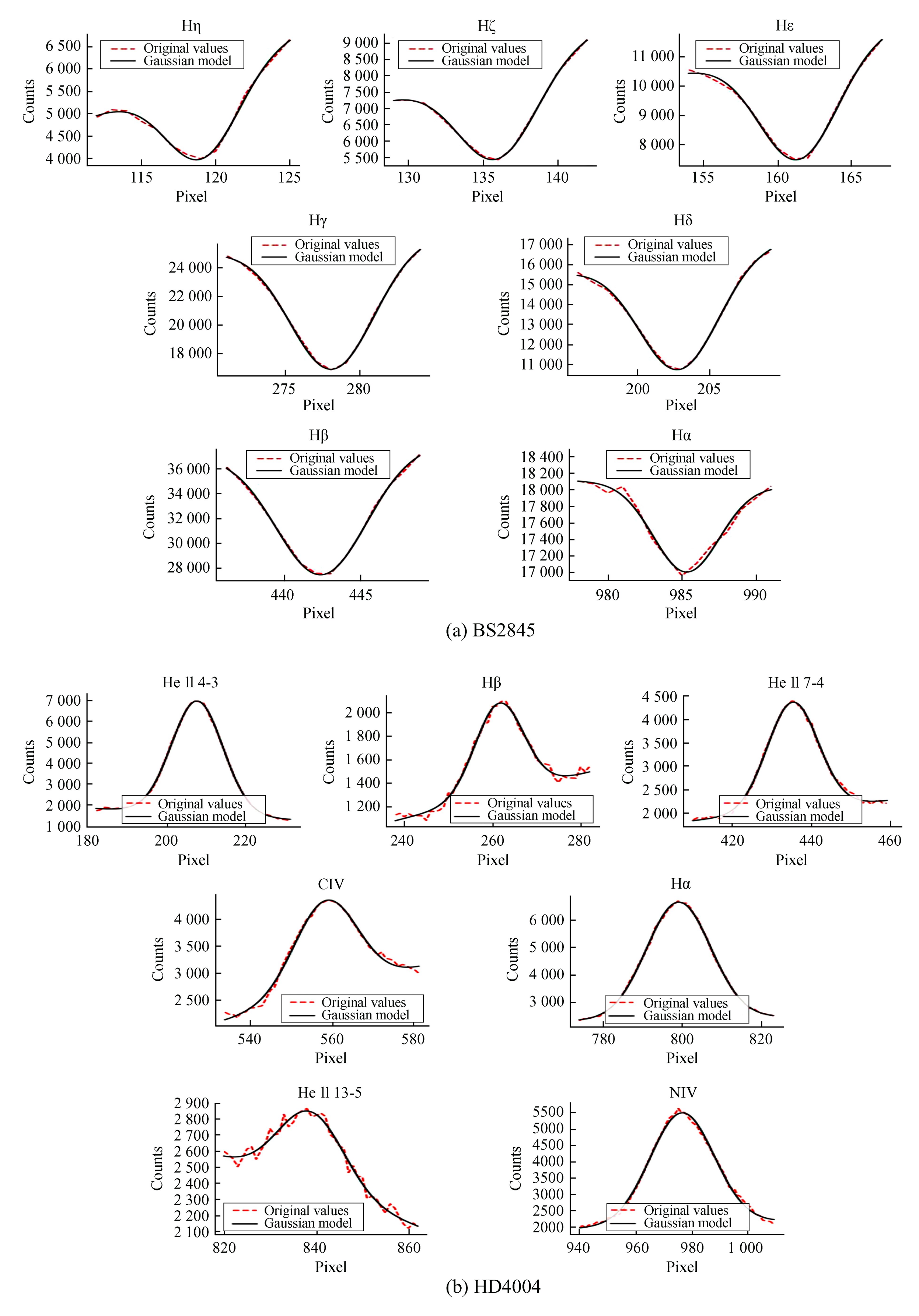


图 6 (a)BS2845 的谱线线心拟合图；(b)HD4004 的谱线线心拟合图

Fig. 6 (a) The spectral line center fitting plot of BS2845; (b) the spectral line center fitting plot of HD4004

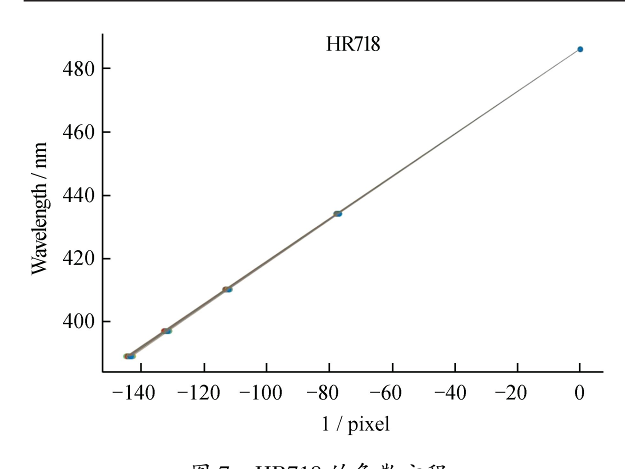


图 7　HR718 的色散方程

Fig. 7　Dispersion equation of HR718

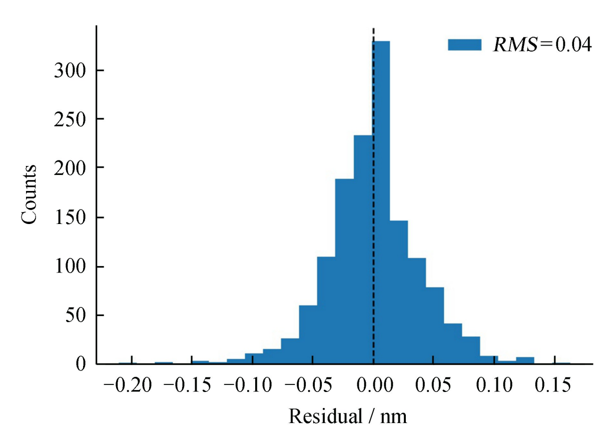


图 8　HR718 的色散方程的拟合残差直方图

Fig. 8　Fitted residuals of the dispersion equation for HR718

由于色散方程使用二次多项式拟合，色散方程的 3 个系数为常数项、一次项和二次项。我们使用参考点(Hβ 线心)的位置坐标对色散方程的 3 个系数进行分析，在 CCD 不同位置处色散方程的系数分布见图 10。3 次测试得到的色散方程系数在 CCD 上的分布，从左到右依次是常数项、一次项和二次项系数，横纵坐标单位是 pixel，颜色代表色散系数的数值，(a)第 1 次测试，(b)第 2 次测试，(c)第 3 次测试。第 1 次测试的数据分布在 CCD 上大致 8 个位置，色散方程的 3 个系数在 CCD 的不同位置上有细微差别，尤其是靠近 CCD 边缘的一个位置处差异明显；第 2 次测试的数据呈线状分布，这和观测时拍摄的移动方向有关，色散方程的 3 个系数在 CCD 的不同位置上有明显差别；第 3 次测试数据覆盖了 CCD 的大部分区域，色散方程的 3 个系数在 CCD 上的颜色分区非常明显。综合这 3 次测试的结果可知，色散方程存在空间分布。将第 3 次测试得到色散方程中随机选择一个用于对第 3 次测试剩余所有的数据进行波长定标，计算视向速度的拟合精度，视向速度误差是 197 km/s。

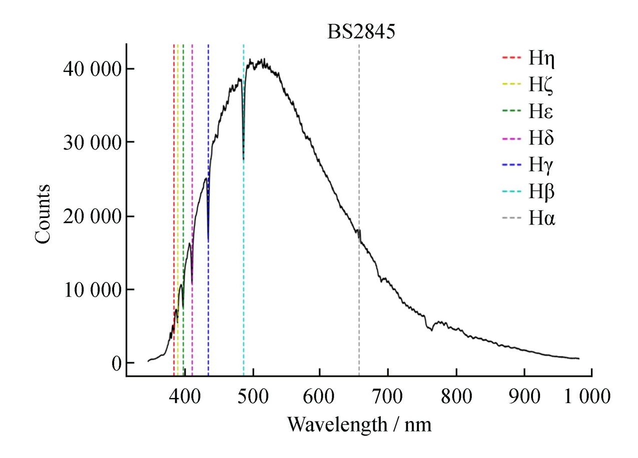


图 9　对 BS2845 波长定标后的一维光谱

Fig. 9　One-dimension spectrum of BS2845 after wavelength calibration

将吸收线(或发射线)与参考点的距离 l 代入色散方程得到一系列由色散方程计算得到的波长值，即拟合波长。色散方程的常数项为参考点处的拟合波长，可对其进行统计并计算残差的标准差。图 11 是参考点处拟合波长的直方统计图，右上方标出了参考点残差的标准差。图 11 反映了数据的稳定性，显然第 1 次测试的参考点更稳定。

由拟合残差可得视向速度的拟合精度，但这只是总的视向速度精度的一部分，还要考虑 CCD 上不同位置处色散方程的差异对空间分布的影响。第 1 次测试得到标准星 BS6117 的 141 条色散方程，分布在 CCD 上大致 8 个位置，其中一个位置只有一条数据。我们计算其余 7 个位置处的拟合视向速度精度，假设 5×5 pixels 范围内的色散方程相同，则第 1 次测试得到的 7 个不同位置处的视向速度精度如表 3。表 3 列出了在 CCD 的 7 个位置上吸收线 Hζ，Hε，Hδ，Hγ 和 Hβ 处的视向速度拟合精度，第 7 个位置是图 10(a)颜色偏嫩绿色的那个位置处的数据。第 2 次测试数据中因为同一个源的数据过少，所以没有估计视向速度精度。第 3 次测试数据中目标源 HR3173 的数据同时有零级像以及一级谱信息，假设在 8×13 pixels 范围内的色散方程相同，以零级谱作为波长 0 点(参考点)，其视向速度精度见表 4，表 4 列出了 HR3173 吸收线 Hε，Hδ，Hγ 和 Hβ 处的视向速度拟合精度。

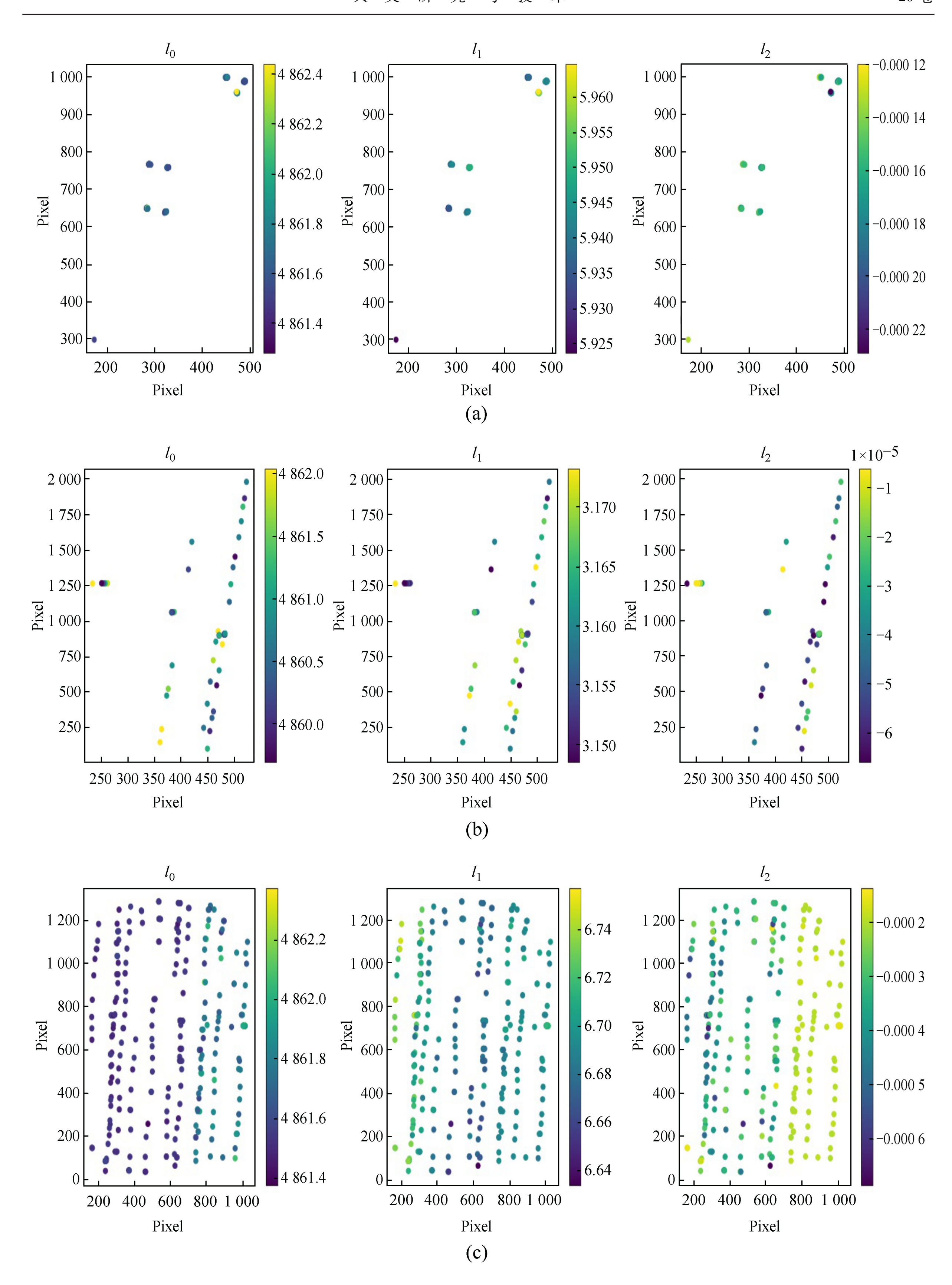


图 10 3 次测试得到的色散方程系数在 CCD 上的分布，从左到右依次是常数项、一次项和二次项系数，(a)第 1 次测试；(b)第 2 次测试；(c)第 3 次测试

Fig. 10 Distribution of dispersion equation coefficient on CCD from three tests, from left to right are constant term, primary term, secondary term coefficient, (a) the first test, (b) the second test, and (c) the third test

表 3　第 1 次测试中 7 个不同位置处的视向速度精度

Table 3　Radial velocity accuracy at seven different positions in the first test

Spectral lines	Hζ	Hε	Hδ	Hγ	Hβ
Position 1 (km/s)	17	18	15	8	0.5
Position 2 (km/s)	19	19	17	10	0.6
Position 3 (km/s)	22	24	15	9	0.6
Position 4 (km/s)	20	22	14	8	0.5
Position 5 (km/s)	28	29	12	9	0.6
Position 6 (km/s)	13	15	9	4	0.3
Position 7 (km/s)	40	43	17	12	0.8

表 4　第 3 次测试中有零级像数据的视向速度精度

Table 4　Radial velocity accuracy of zero-level image data in the third test

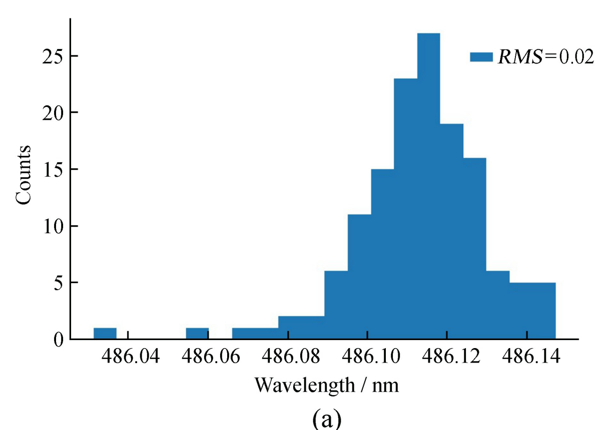
Spectral lines	Hε	Hδ	Hγ	Hβ
Accuracy of radial velocity (km/s)	21	29	32	9

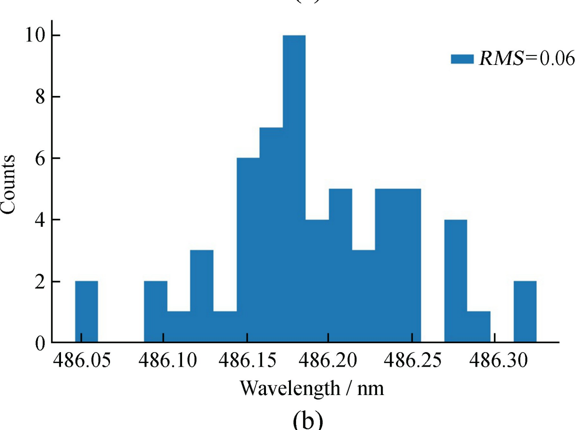
为了验证测试效果，我们将 HR3173 的数据随机分成两组，一组 27 条数据用于拟合一个色散方程，以零级像为波长零点(参考点)。另一组 26 条数据用于验证，将这 26 条数据按照第 1 组数据拟合的色散方程进行波长定标，计算 CCD 上 8 × 13 pixels 范围内的视向速度的拟合精度。表 5 是验证后的视向速度，平均视向速度精度为 51 km/s。

表 5　验证后的视向速度精度

Table 5　Verified radial velocity accuracy

Spectral lines	Hε	Hδ	Hγ	Hβ
Accuracy of radial velocity (km/s)	64	56	35	47





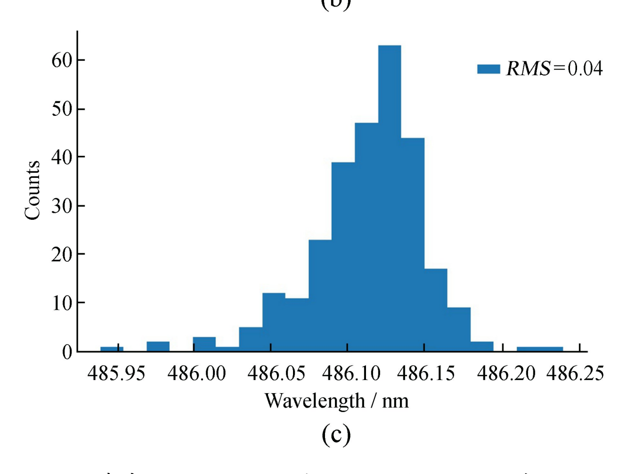


图 11　参考点拟合结果的直方图统计图。(a)第 1 次测试；(b)第 2 次测试；(c)第 3 次测试

Fig. 11　Histogram chart of fitting accuracy at the reference point of the three tests, from top to bottom, (a) the first test, (b) the second test, and (c) the third test

我们根据 HR3173 的 53 条数据的零级谱位置信息和色散方程的 3 个系数，进行 3 个二次曲面拟合。我们根据拟合结果，求出在 HR3173 零级像位置范围内 5 条带零级谱的 HR718 的数据的色散方程，并计算出 CCD 上 8 × 13 pixels 范围内的平均视向速度精度为 51 km/s。

6　总结与展望

我们在兴隆 80 cm 望远镜上进行了无缝光谱地面测试，利用 2021 年 3 月 20 日、2022 年 1 月 18

日到 20 日和 2022 年 11 月 8 日 3 次的观测数据，通过多项式拟合得到了色散方程，并分析了色散方程系数在探测器上的分布情况，同时我们还计算了拟合残差，用于评估视向速度的拟合精度。结果表明，探测器上不同位置的色散有明显差异。我们对 HR3173 的 53 条数据的零级谱位置信息及色散方程系数进行了二次曲面拟合，并利用该曲面对 HR3173 零级像位置范围内的 HR718 数据进行了波长定标，得到了 CCD 上 8×13 pixels 范围内的平均视向速度精度为 51 km/s。本工作还存在一些不足之处，如在抽谱过程中没有考虑平场的影响，以及在选源观测时没有选择谱线丰富且清晰的目标源。由于带零级谱的数据没有覆盖整个 CCD 范围，我们建立的二维曲面只能对部分数据进行波长定标。目前我们已经完成了对 CCD 上色散差异以及视向速度精度的初步测试。下一步工作需获取更多带零级谱且覆盖整个 CCD 范围的数据，进一步标定不同视场位置处的待测光谱，并构建平场立方体对数据进行修正，同时还需要测试无缝光谱系统的稳定性以及图像畸变情况，以得到更可靠的结论。

致谢：感谢兴隆观测站工作人员以及巡天空间望远镜无缝光谱数据团队的支持。感谢方玄、周志中、陈建军、江林华、刘凤山、刘超等各位老师提供的第 1 次观测数据，感谢黄样老师、曹子皇老师等协助完成第 3 次地面测试观测。感谢曹雅楠、肖光耀、王培培同学的无私帮助，以及其他老师和同学的大力帮助与支持。

参考文献：

[1] KÜMMEL M, WALSH J, PIRZKAL N, et al. The slitless spectroscopy data extraction software aXe [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2009, 121(875): 59-72.

[2] SMITH M G, BOKSENBERG A, CARSWELL R F, et al. Confirmation of the highest redshift QSO candidates from the Tololo deep survey [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181(1): 67P-69P.

[3] WALSH J R, KÜMMEL M, KUNTSCHNER H. Slitless spectroscopy with HST instruments [C]// Proceedings of the 2010 STSci Calibration Workshop. 2010: 77-85.

[4] PASQUALI A, PIRZKAL N, LARSEN S, et al. Slitless grism spectroscopy with the *Hubble Space Telescope* Advanced Camera for Surveys [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118(840): 270-287.

[5] KÜEMMEL M, LARSEN S S, WALSH J R. Slitless spectroscopy with the Advanced Camera for Surveys [C]// Proceedings of the 2005 HST Calibration Workshop. 2005: 85-94.

[6] WILLOTT C J, DOYON R, ALBERT L, et al. The near-infrared imager and slitless spectrograph for the James Webb Space Telescope. II. Wide field slitless spectroscopy [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2022, 134(1032): 025002.

[7] OUTINI M, COPIN Y. Forward modeling of galaxy kinematics in slitless spectroscopy [J]. Astronomy and Astrophysics, 2020, 633: A43.

[8] LIN H, GONG Y, CHEN X L, et al. Forecast of neutrino cosmology from the CSST photometric galaxy clustering and cosmic shear surveys [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 515(4): 5743-5757.

[9] 詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天 [J]. 科学通报, 2021, 66(11): 1290-1298.
ZHAN H. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(11): 1290-1298.

[10] FAN Z, WANG H J, JIANG X J, et al. The Xinglong 2.16-m Telescope: current instruments and scientific projects [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2016, 128(969): 115005.
[11] HUANG F, LI J Z, WANG X F, et al. The photometric system of the Tsinghua-NAOC 80-cm telescope at NAOC Xinglong Observatory [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(11): 1585-1596.
[12] LARSEN S S, WALSH J, KÜMMEL M. Wavelength and flux calibration of the ACS/HRC PR200L prism [R/OL]. (2006-03-03) [2022-07-13]. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2006acs..rept....3L.
[13] LARSEN S S, KÜEMMEL M, WALSH J R. Calibration of ACS prism slitless spectroscopy modes [C] // Proceedings of the 2005 HST Calibration Workshop. 2005: 103-108.
[14] BERTIN E, ARNOUTS S. SExtractor: software for source extraction [J]. Astronomy and Astrophysics Supplement, 1996, 117(2): 393-404.
[15] ST-LOUIS N. Revealing the asymmetry of the wind of the variable wolf-rayet star WR1 (HD 4004) through spectropolarization [J]. The Astrophysical Journal, 2013, 777(1): 9.
[16] HAMANN W R, GRÄFENER G, LIERMANN A. The Galactic WN stars: spectral analyses with line-blanketed model atmospheres versus stellar evolution models with and without rotation [J]. Astronomy and Astrophysics, 2006, 457(3): 1015-1031.
[17] NIEDZIELSKI A. The optical spectrum of HD 4004 (WN4b). Evidence of variability [J]. Acta Astronomica-Warsaw and Cracow, 1998, 48(4): 729-746.

CSST Slitless Spectroscopy Ground Test Based on the 80 cm Telescope at the Xinglong Observatory

Qiu Xiaoqing[1,2], Fan Zhou[2*], Song Yihan[2], Gu Hongrui[2,3], Jiang Haijiao[4], Li Jing[1]

(1. China West Normal University, Nanchong 637000, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China, Email: zfan@bao.ac.cn; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The Chinese Space Station Telescope (CSST), which is expected to be launched in 2025, will mainly be used for large-scale multicolor imaging and slitless surveys. Before launch, it is necessary to use ground-based telescopes to conduct ground tests on the optical imaging system, detectors, and equipment of the space telescope for long-term operational stability. This dissertation designs a slitless spectral ground test for the 80 centimeter telescope at Xinglong Observation Observatory. By utilizing the strong absorption and emission line characteristics of A-type stars, B-type stars, and the Wolf-Rayet star HD4004, the dispersion equation is fitted and found to have spatial distribution characteristics. We performed quadratic surface fitting on the zero order spectral position information and dispersion equation coefficients of 53 pieces of HR3173 data, and used this curve to calibrate the wavelength of HR718 data within the zero order image position range of HR3173. The average radial velocity accuracy obtained was 51 km/s.

Key words: slitless spectroscopy; CSST; wavelength calibration